

Aportaciones fisiológicas de la medida continua de la saturación de oxígeno en atletas de ambos sexos que realizan pruebas de esfuerzo máximas

P. Martín-Escudero¹, F. Miguel-Tobal¹, A. Bilbao Monasterio¹, M. Galindo Canales¹,
J. P. Silveira Martín², M. L. Dotor Castilla², D. Golmayo Fernández², R. Giannetti⁴, S. López-Silva⁵

Fisiología del Ejercicio

Aportaciones fisiológicas de la medida continua de la saturación de oxígeno en atletas de ambos sexos que realizan pruebas de esfuerzo máximas

P. Martín-Escudero¹, F. Miguel-Tobal¹, A. Bilbao Monasterio¹, M. Galindo Canales¹, J. P. Silveira Martín², M. L. Dotor Castilla², D. Golmayo Fernández², R. Giannetti⁴, S. López-Silva⁵

Physiological contributions of the continuous measurement of the saturation of oxygen in athletes of both sexes during the accomplishment of an exercise stress test

Resumen

El objetivo de este estudio se centra en la monitorización continua de la saturación de oxígeno en sangre en deportistas durante la realización de una prueba de esfuerzo máxima. El conocimiento de la evolución de la saturación de oxígeno durante el ejercicio podría ser un parámetro útil para la valoración de la mejora del rendimiento deportivo. La medida continua de la saturación de oxígeno en sangre mediante oximetría de pulso no necesita de un montaje de aparatos de medida tan sofisticado como los utilizados en las pruebas de esfuerzo en la actualidad. Para este trabajo se han tomado medidas durante la prueba de esfuerzo máxima en tapiz rodante y la recuperación (5 min) en una población de 51 deportistas sanos voluntarios (25 deportistas varones y 26 deportistas mujeres). Esta medida se ha realizado con dos oxímetros de pulso, uno comercial portátil de última generación (Pulsos-3i de Minolta) y otro un

prototipo desarrollado en el Instituto de Microelectrónica de Madrid. Los resultados obtenidos con este tipo de medidas oximétricas han presentado coeficientes de correlación elevados ($r=0,88$), para ambos sexos, entre el consumo máximo de oxígeno y el tiempo de duración de la prueba y correlaciones muy elevadas entre el tiempo en aparecer el segundo umbral ventilatorio y el tiempo en aparecer el valor más bajo de saturación de oxígeno en sangre ($r=0,87$). Esto es de gran interés, porque nos indica la saturación de oxígeno como un valor con potencial futuro en la ayuda a la determinación del segundo umbral ventilatorio.

Selección, 2006; 15 (3):132-143

Palabras clave: Sistema respiratorio. Ejercicio. Deporte. Oxígeno. Intercambio de gas. Función pulmonar. Monitorización de gases sanguíneos. Oxímetro de pulso. Saturación.

Summary

The objective of this study is the continuous measurement of blood oxygen saturation in athletes while performing an exercise stress test. The knowledge of the evolution of oxygen saturation during exercise could be a useful parameter for evaluating the improvement in sports performance. The continuous measurement of blood oxygen

¹ Escuela Profesional de Medicina de la Educación Física y el Deporte, Fac. de Medicina-UCM

² Instituto de Microelectrónica de Madrid CNM-CSIC

³ Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid. CSIC

⁴ Escuela Superior de Ingenieros Industriales Universidad Pontificia Comillas Madrid

⁵ Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. ULPGC.

Recibido: 06.10.06

Aceptado: 10.10.06

saturation by means of pulse oximetry requires less sophisticated apparatus than current measurements. The study was performed in 51 voluntary healthy athletes (25 males and 26 females). Measurements have been performed with two pulse oximeters, one commercial portable of last generation (Pulsos-3i of Minolta) and another one that is a prototype developed at the Institute of Microelectronics of Madrid, during a treadmill test and the recovery period. The results obtained with this type of measurements presented high correlation coefficients ($r=0.88$) in both sexes between VO_2 max and the time of duration of the test and between the time the second threshold appeared and the time in which the lowest value of saturation of oxygen in blood ($r=0.87$) appeared. This is of great interest because saturation of oxygen could be a value with future potential in the determination of the second ventilatory threshold.

Key words: The respiratory system. Exercise. Sport. Oxygen. Gas exchange. Pulmonary function. Blood gas monitoring. Pulse oximeter. Saturation.

Introducción

La oximetría de pulso estima, mediante la saturación de oxígeno en la sangre (SpO_2), la presión parcial de oxígeno en sangre. Esta técnica analiza la señal pulsátil que se genera con la variación de flujo sanguíneo arterial con el pulso generado por el latido del corazón (1-3). Se aplica de una manera continua como técnica no invasiva, en la monitorización de pacientes durante todo el proceso de anestesia y cuidados intensivos (4) en el control de neonatos (5, 6), evaluación y seguimiento de trastornos pulmonares crónicos y nocturnos (7, 9) y en medicina deportiva (8).

Esta técnica se basa en la emisión de luz de láser a diferentes longitudes de onda y la utilización de las diferentes absorciones espectrales, obtenidas en el fotodiodo, de las distintas variedades de hemoglobina: hemoglobina reducida (Hb), hemoglobina oxigenada u oxihemoglobina (HbO_2), carboxihemoglobina ($HbCO$), y en menor medida, metahemoglobina (Hi) y sulfahemoglobina (SHb). Los diferentes espectros de absorción, recibidos por los fotodiodos, de estas variedades, permiten su detección y cuantificación, utilizando diferentes intervalos espectrales (Figura 1 y 2).

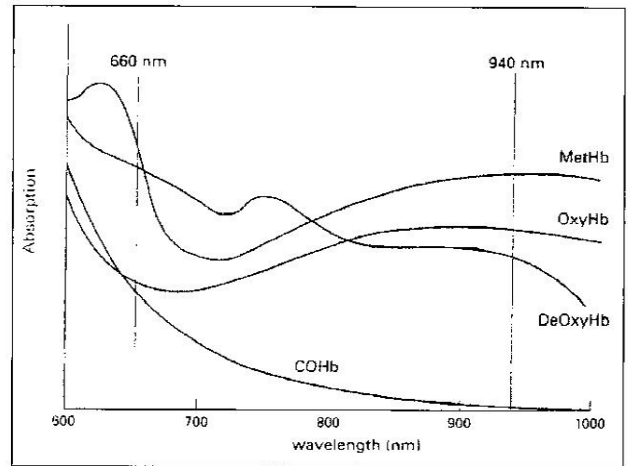


Figura 1. Espectro de absorción de las principales variedades de la hemoglobina adulta normal.

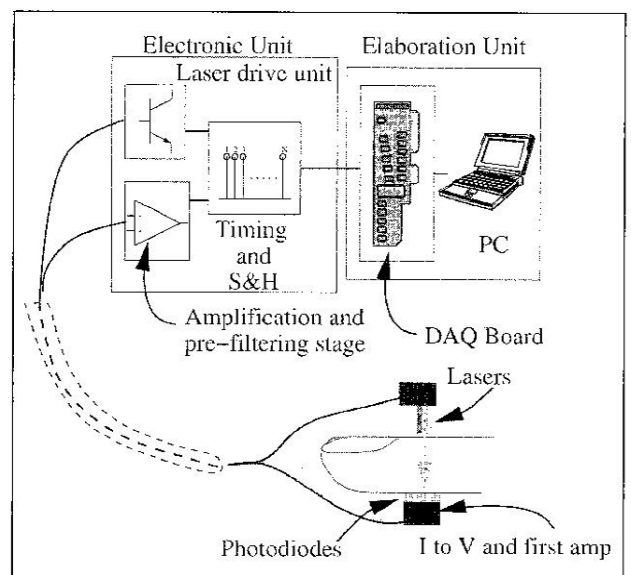


Figura 2. El sistema de medida está compuesto por el sensor óptico basado en diodos láser del infrarrojo cercano, fijado al extremo de un dedo (lecho vascular pulsátil), electrónica del sensor y un ordenador personal (PC) con la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y los programas de adquisición y procesamiento.

Estudios recientes han demostrado que con la utilización de los emisores clásicos en el rojo e infrarrojo se infravalora el nivel de saturación de oxígeno en sangre, para niveles inferiores al 70% (13). La utilización de otras longitudes de onda mejora los resultados de medida en esos niveles. Este problema es importante en la monitorización fetal, en estudios de la apnea del sueño y en personas que realizan esfuerzo físico, donde se alcanzan estos valores.

La oximetría y la prueba de esfuerzo se complementan gracias al control continuo de la saturación de oxígeno periférico y análisis de gases espirados. Esto le transforma en un método apropiado para determinar el límite de esfuerzo cardiopulmonar, que se caracteriza por una caída significativa en la saturación arterial de oxígeno (16).

Los primeros estudios realizados sobre la aplicación del oxímetro durante el esfuerzo fueron los de Norton (18) al que siguieron otros grupos (19,20). Estos trabajos llegaron a la conclusión general de que las sondas de dedo presentan un funcionamiento mejor que las sondas de oreja y que a pesar de tener una precisión de un (2%, se puede utilizar la oximetría de pulso como técnica de medida continua capaz de reemplazar otros métodos invasivos para la determinación de la saturación de oxígeno arterial directa (17, 21).

En este estudio que hemos realizado se analiza la correlación entre la saturación de oxígeno obtenida con dos oxímetros de pulso (prototipo con emisión en el infrarrojo y comercial) y los parámetros ergoespirométricos, obtenidos del análisis de gases durante la realización de la prueba de esfuerzo, con el fin de introducir mejoras en sistemas de oximetría de pulso, que minimicen la influencia del gesto deportivo y el movimiento, en la determinación de la saturación de oxígeno.

Material y métodos

Para la consecución de estos objetivos hemos realizado una serie de pruebas de esfuerzo máximas en tapiz rodante, monitorizando electrocardiográficamente y determinando un conjunto de variables ergoespirométricas a través de un analizador de gases de respiración a respiración, a un grupo de deportistas de ambos sexos y diversas modalidades deportivas. Conjuntamente a la realización de dicha prueba de esfuerzo máximo se mide la saturación de oxígeno periférico a través de un oxímetro de pulso comercial y se correlacionan posteriormente estos resultados con un prototipo de emisión láser en el infrarrojo.

Una vez realizada la prueba de esfuerzo en tapiz rodante, se cotejan en el tiempo los datos ergoespirométricos con los obtenidos por el oxímetro comercial, para posteriormente pasar a realizar un estudio estadístico de dichas variables.

Las pruebas se han realizado en atletas de ambos sexos y de diferentes modalidades deportivas, pero sobre todo de atletismo fondo (deporte aeróbico), atletismo velocidad (deporte anaeróbico) y fútbol (deporte aeróbico-anaeróbico). Todas las medidas se han reali-

zadas en el laboratorio de Fisiología de Esfuerzo de la Escuela de Medicina de la Educación Física y el Deporte de la UCM.

Medidas durante las pruebas de esfuerzo

Población estudiada

Para este trabajo hemos hecho una serie de medidas continuas durante la realización de una prueba de esfuerzo máxima en una población de 51 individuos voluntarios, de ambos sexos, practicantes de diferentes modalidades deportivas, como participantes de un club deportivo y de nivel deportivo loco-regional. Estos 51 deportistas fueron sometidos a una prueba de esfuerzo máxima sobre tapiz rodante, realizando todos ellos el mismo protocolo de esfuerzo. La única diferencia entre los atletas fue el nivel de esfuerzo alcanzado (estadio), que varió en función de la capacidad física de cada uno.

Para evitar sesgos en las pruebas realizadas, aunque la población se recogió consecutivamente en el tiempo, los requisitos para su selección fueron los siguientes:

- Ser atletas varones y mujeres de raza caucásica.
- Ser atletas de competición, especialmente participantes en deportes de carácter aeróbico; algunos de ellos situados en los primeros puestos en el "ranking" nacional y provincial.
- Haber entrenado con dedicación a su deporte, previamente al estudio, durante al menos 2 a 5 años.
- Ser deportistas que mantengan un entrenamiento regular semanal entre 1 y 3 horas / día, durante 4 a 6 días a la semana, además de la competición. Estos voluntarios mantenían dicha práctica deportiva hasta el día anterior a realizar el presente estudio.
- No tomar fármacos ni sustancias dopantes que pudiesen interferir en las determinaciones fisiológicas realizadas.

Las características demográficas de la población estudiada son las expuestas en la Tabla I.

En todos los casos, con anterioridad al estudio, se había explicado al atleta la naturaleza del trabajo a efectuar, insistiendo sobre su inocuidad y finalidad. Se les pidió autorización escrita y firmada para su realización.

Protocolo específico

Cada deportista realizó una prueba de esfuerzo incremental máxima. El consumo de oxígeno y la pro-

TABLA I
Datos demográficos de media y desviación estándar de la población estudiada

	<i>Total estudiados</i>	<i>Deportistas varones</i>	<i>Deportistas mujeres</i>
Número	51	25	26
EDAD (años)	26,5 ± 9,6	28 ± 11,1	23,9 ± 6,3
TALLA (cm)	167,5 ± 7,8	173,3 ± 5,1	162,8 ± 6,3
PESO (Kg)	61,5 ± 9,4	67,1 ± 9,1	56,4 ± 6,8

ducción de dióxido de carbono fueron medidos con un analizador de gases espirados (Vmax de SANRO). Este analizador se calibró antes y después de cada test.

La monitorización cardiaca (electrocardiógrafo-visualizador-registrador, Burkitt), así como los dos pulsioxímetros (prototipo, realizado en un laboratorio de Física Electrónica; y comercial, pulsos-3i de Minolta) registraron continuamente durante el calentamiento, ejercicio máximo y recuperación (Figura 3).

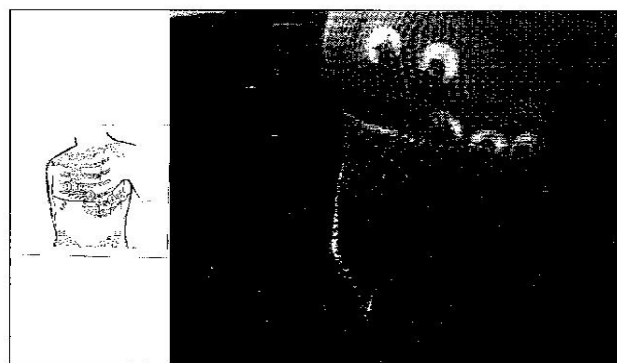


Figura 3. Esquema y fotografía de la colocación de electrodos de registro electrocardiográfico.

La prueba se consideró máxima, cuando se observaron los siguientes criterios:

- Cambio en el valor de VO₂ < 150 ml/min (meseta), durante incremento de carga.
- Cociente respiratorio >1,1.
- Frecuencia cardiaca máxima similar o superior a la teórica esperada.

Test de esfuerzo máximo en tapiz rodante (H/p/cosmos QUASAR 4,0):

- Protocolo: 1) *calentamiento* de 4 minutos, los dos primeros a una velocidad de 6 km/h, y los dos siguientes a 8 km/h, ambos estadios sin pendiente. 2) *ejercicio*, que empieza con 1 minuto en

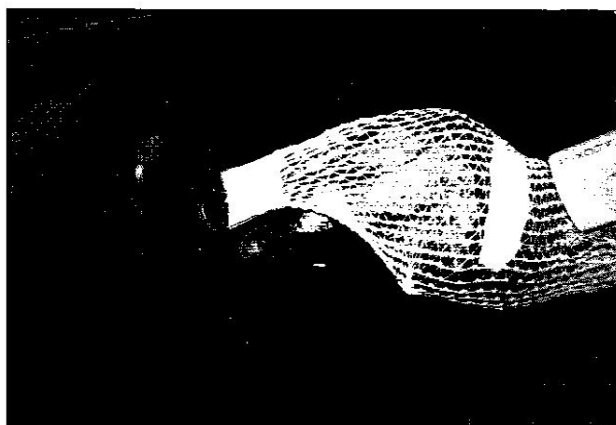
el que el deportista o la deportista permanecen quietos, para que podamos registrar valores basales. A continuación, empieza rodando durante 2 minutos, a una velocidad de 6 km/h y con una pendiente del 1%. La prueba irá incrementándose en velocidad (de 2 en 2 km/h) cada 2 minutos, hasta que el deportista no pueda continuar. La pendiente de 1% se mantiene constante hasta alcanzar una velocidad de 16 km/h, a partir de la cual se pasa a un 3% de pendiente. Para las mujeres deportistas el incremento del 3% de pendiente del tapiz se iniciaba a 14 km/h (Figura 4). 3) *Recuperación*: Posteriormente se realizaba una recuperación activa en la que durante dos minutos trotaban a una velocidad de 8 km/h - 0% de pendiente y otros dos minutos a una velocidad de 6 km/h - 0% de pendiente. Durante la recuperación se tomó la tensión arterial en el minuto 3 y 5, teniendo en todos los casos una recuperación hemodinámica normal.

En ambos tipos de prueba de esfuerzo, se dispusieron los dedos tercero en la concavidad de los dos oxímetros: el comercial en la mano derecha, y el pro-



Figura 4. La deportista, con todos los sistemas de medida conectados, situado encima del tapiz rodante. Se observan los oxímetros fijados en las manos, los electrodos para el registro electrocardiográfico y la boquilla con el analizador de flujo.

totipo en la izquierda. Se tuvo cuidado con que la luz incidiese perpendicularmente al lecho ungueal y se ancló a través de una fijación con venda elástica transpirable para minimizar el efecto del movimiento (Figuras 5a y 5b). Después, se inició el registro oximétrico. Se comprobó la correcta disposición del mismo, tras un minuto de autocalibración, cotejando las frecuencias cardiacas del electrocardiograma y de los oxímetros. En el momento en que finalizaba la prueba, se desconectaban al mismo tiempo ambos pulsioxímetros.



Figuras 5a y 5b. Colocación del oxímetro comercial Pulsox-3i y fijación con venda elástica transpirable.

Los datos del oxímetro fueron leídos y transformados a formato texto para su lectura posterior a través de un programa integrado que posee el oxímetro. Una vez transferidos del programa informático del oxímetro, fueron analizados y reescalados convenientemente. Paulatinamente en el tiempo, fueron estudiados cada 10 segundos y abstraídos para su colocación en una

hoja de cálculo. Posteriormente, fueron ensamblados en el tiempo en la misma hoja de cálculo, una hoja por deportista, con los obtenidos cada 30 segundos, desde el ergoespirometro. Esto se realizó con el programa de cálculo Excell.

Recogida de variables para el análisis estadístico

Las variables tomadas para el estudio estadístico fueron las siguientes:

1. Del conjunto oximétrico:

1A) **Registro temporal continuo de la saturación de oxígeno (SpO₂):** valor funcional de saturación de oxígeno de la hemoglobina.

1B) **Frecuencia del pulso.**

2. Del conjunto ergoespirométrico:

2A) **Frecuencia cardiaca.**

2B) **Ventilación pulmonar.**

2C) **Equivalentes de dióxido de carbono y de oxígeno:** cociente entre ventilación y consumo de oxígeno y anhídrido carbónico, respectivamente, para la determinación de umbrales ventilatorios aerobios y anaerobios.

2D) **Consumo máximo de oxígeno (VO₂ máx):** volumen máximo de oxígeno que un individuo puede consumir por unidad de tiempo en el curso de un ejercicio intenso.

Materiales empleados

Para la realización del presente trabajo se dispuso de material diverso, que hemos clasificado del siguiente modo:

1. Material necesario para las pruebas de esfuerzo.
2. Material necesario para la prueba oximétrica.

Dentro de cada grupo tenemos los siguientes componentes:

1. Material necesario para la prueba de esfuerzo

- A. Tapiz rodante o "treadmill ergometer" (H/p/ cosmos QUASAR 4,0)
- B. Analizador de gases espirados (Sensor Medics V max 29 Cardiopulmonary de Sanro).
- C. Conjunto electrocardiograma-visualizador-registrador (Burdick, INC, Modelo Quest Exercise Stress System).
- D. Electrodo para registro electrocardiográfico.
- E. Desfibrilador Cardio A10, DMS 603/MR (S&W) y material de emergencia para resucitación cardiopulmonar avanzada.
- F. Tensiómetros para toma de tensión arterial.

2. Material necesario para la prueba oximétrica:

- A. Oxímetro de pulso comercial Pulsox-3i (Minolta).

B. Prototipo desarrollado por Instituto de Microelectrónica e Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid CNM-CSIC; Escuela Superior de Ingenieros Industriales Universidad Pontificia Comillas Madrid; Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. ULPGC.

Todos los aparatos de medición fueron calibrados previamente a la realización del estudio.

Los datos, una vez transferidos del programa informático del oxímetro, fueron analizados y reescalados convenientemente. Paulatinamente en el tiempo, fueron estudiados cada 10 segundos y abstraídos para su colocación en una hoja de cálculo, tal como se refleja en la Tabla 3. Posteriormente fueron ensamblados en el tiempo y en la misma hoja de cálculo, una por deportista, con los obtenidos cada 30 segundos, desde el ergoespirómetro. Esto se realizó con el programa de cálculo Excel.

Los datos analizados para estudio en la hoja de cálculo fueron los siguientes:

- Sat O₂: Saturación de oxígeno periférico.
- Fr Ox: Frecuencia del oxímetro.
- Fr Card: Frecuencia cardiaca obtenida por el Burkitt.
- Eq CO₂: Equivalente de anhídrido carbónico.
- Eq O₂: Equivalente de oxígeno.
- VE: Ventilación (litros/minuto).
- VO₂ max: Consumo máximo de oxígeno.

Los criterios utilizados para la determinación de los umbrales ventilatorios fueron los de Davies de 1985, que en resumen son los siguientes:

Umbral ventilatorio 1, (VT₁), umbral aeróbico:

1. Primer incremento no lineal de la ventilación;

2. Aumento del equivalente de oxígeno sin aumento simultáneo del equivalente de dióxido de carbono;
3. Salto ventilatorio.

Umbral ventilatorio 2, (VT₂), umbral anaeróbico:

1. Segundo cambio desproporcionado, no lineal de la ventilación;
2. Incremento no lineal del equivalente de oxígeno con aumento simultáneo del equivalente de dióxido de carbono;
3. Salto ventilatorio.

Resultados

1) Medida de la prueba de esfuerzo máxima

Se ha realizado un estudio y análisis descriptivo de diferentes parámetros obtenidos en los deportistas durante la realización de una prueba de esfuerzo en tapiz rodante. También hemos analizado el tiempo de la prueba, donde empieza a aparecer un descenso significativo del valor de saturación de oxígeno en sangre, para el grupo de deportistas que realizaron la prueba de esfuerzo en tapiz rodante y donde se obtuvieron resultados satisfactorios de registro para el oxímetro comercial. El valor de descenso de la saturación de oxígeno se obtuvo para cada uno de los deportistas sometidos a estudio, ver Figura 6.

En las Tabla IV y V presentamos los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a atletas en tapiz (varones y mujeres), conjuntamente con resultados satisfactorios por parte del oxímetro comercial, y ordenados en orden ascendente en función del consumo máximo de oxígeno (VO₂ max) alcanzado, como valor indicativo de mayor resistencia física. En ellas se muestran los valores del consumo máximo de oxígeno

TABLA III
Hoja de cálculo utilizada para el estudio de las distintas variables

HORA	Sat O ₂	Fr Ox	Fr Card	Eq CO ₂	VE	VO ₂	Eq O ₂	Km/h
:00:00	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	h1
:00:05	a2	b2						
:00:10	a3	b3	c2	d2	e2	f2	g2	h2
:00:15	a4	b4						
:00:20	a5	b5	c3	d3	e3	f3	g3	h3
:00:25	a6	b6						
:00:30	a7	b7	c4	d4	e4	f4	g4	h4

(Las indicaciones a1...a_n, b1...b_n, c1 a i1 se refieren a los valores tomados y cotejados consecutivamente en el tiempo)

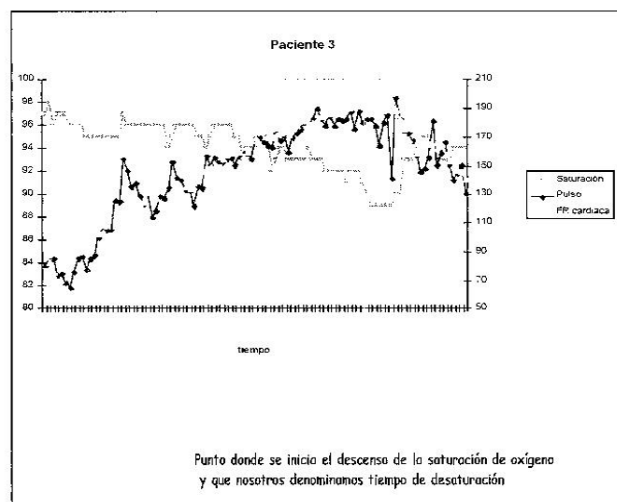


Figura 6. Ejemplo de evolución de la saturación de oxígeno determinado con el oxímetro comercial y su relación con los valores de pulso y frecuencia cardiaca.

no, la frecuencia cardiaca máxima, el tiempo de duración de la prueba, el tiempo donde empieza a aparecer un descenso significativo del valor de la saturación de oxígeno en sangre obtenido a través del oxímetro comercial y el tiempo de prueba donde aparece el segundo umbral obtenido por método ventilatorio.

El oxímetro Pulsos-3i de Minolta (Figura 7) consta de un sensor tipo pinza para su colocación en un dedo de la mano para la medida en transmisión. Usa dos longitudes de onda, las más comúnmente utilizadas en oximetría de pulso, una de ellas en el infrarrojo cercano y otra en el visible. Este sensor está fabricado con una goma de gran agarre y resistente al deslizamiento, lo que lo hace ser muy adecuado para el tipo de medidas que queremos realizar, aunque como muestra este estudio, no es suficiente para su uso durante la realización de ejercicio con movimientos bruscos de las extremidades superiores. Durante la medida el sistema va almacenando los valores de SpO₂ y del pulso cada 5 segundos.

Mujeres						Varones					
Deportistas mujeres	VO2 máx. (ml/kg/min)	F.C. máxima	Tiempo de prueba (min.)	Tiempo de VT2	Tiempo de desaturación	Deportistas varones	VO2 máx. (ml/kg/min)	F.C. máxima	Tiempo de prueba (min.)	Tiempo de VT2	Tiempo de desaturación
37	37,09	192	7:30	6:50	6:10	4	40,52	171	8:37	6:40	8:30
40	37,47	168	9:30	8:10	7:00	11	49,32	184	13:00	12:10	11:30
38	38,08	198	8:50	7:20	9:00	47	50,4	191	11:20	9:40	10:00
30	39,71	184	9:10	8:00	8:10	9	53,8	204	12:10	8:00	9:10
31	41	205	9:30	7:40	7:10	51	53,81	206	14:10	10:30	10:50
43	41	205	9:10	6:40	6:30	5	55,78	186	13:30	11:00	11:50
36	42,6	184	9:30	8:50	7:50	6	56,73	182	11:27	9:10	11:40
33	43,7	190	10:00	8:10	8:50	3	57,24	174	11:50	10:50	11:30
41	45,73	195	10:00	8:30	9:10	50	57,31	204	12:50	10:20	9:20
32	47,18	196	10:40	9:30	9:50	44	59,22	198	11:20	8:10	7:40
39	47,61	187	9:50	12:00	11:40	1	59,32	182	11:00	8:50	10:50
35	47,83	190	10:00	9:10	9:30	49	60,44	199	13:50	10:50	13:20
24	49,54	185	9:40	7:50	7:30	14	60,94	180	15:20	10:40	11:00
34	49,95	189	10:30	9:10	9:40	12	61,05	196	11:40	8:40	9:30
42	50,04	191	10:40	8:20	8:40	46	61,26	197	13:00	10:40	11:10
15	50,92	181	11:00	8:30	8:50	53	61,26	199	12:40	9:50	10:10
29	51,1	172	10:30	9:00	9:50	45	61,5	198	12:40	8:30	10:20
18	51,33	187	10:00	6:20	7:10	7	62,9	181	11:10	9:20	10:30
27	52,95	194	12:53	8:10	10:10	48	64,27	206	13:20	10:50	10:20
26	53,49	194	10:50	7:40	6:10	13	64,43	190	13:50	11:50	10:50
25	54,12	198	10:40	8:10	10:10	54	67,13	192	14:30	11:50	12:50
21	57,79	195	11:50	10:10	9:50	52	67,62	183	14:50	12:10	12:20
19	61,62	190	12:20	9:30	9:40	8	69,7	180	12:30	11:40	9:30
23	64,59	184	10:10	9:40	8:20	10	76,9	187	16:20	14:30	14:20
22	64,67	180	13:10	10:00	9:50	2	81,73	186	17:00	13:00	16:10
20	64,78	189	12:25	8:50	9:00						



Figura 7. Oxímetro Pulso de Minolta. Se puede observar el sensor tipo pinza y su tamaño portátil.

Una de las tareas de gran importancia en este proyecto ha sido la colocación del sensor de los oxímetros en los dedos de los deportistas. Las medidas realizadas sobre tapiz rodante, que es aplicable a la mayoría de los deportistas, han sido aceptables sólo un 75% de las medidas de registro oximétrico, debido al mayor movimiento que se realiza durante este tipo de prueba. El porcentaje de pruebas positivas con el oxímetro ha mejorado en las últimas realizadas, debido a las modificaciones que fuimos introduciendo en los sensores.

Con respecto al prototipo indicar que estos siete últimos años de andadura del grupo de investigación hemos conseguido un buen conocimiento de la obtención de fotopleletismogramas durante la realización de ejercicio y más concretamente durante la realización de pruebas de esfuerzo máximas en tapiz rodante. Como es bien conocido en el mundo de la oximetría de pulso, el ruido generado por artefactos que tienen su origen en el movimiento es una limitación de esta técnica no invasiva. Para intentar superar esta limitación hemos estudiado la señal PPG obtenida durante la realización de pruebas de esfuerzo máximas. Hasta entonces habíamos conseguido obtener una señal relativamente aceptable que nos permitiera estudiarla profundamente. Como resultado ya desarrollamos un procesado de la señal PPG que nos permitiera obtener el pulso, incluso en situaciones extremas de la prueba de esfuerzo. Esto es una gran ventaja con respecto a los oxímetros comerciales, donde a partir de frecuencias cardíacas superiores a 150 lpm, la determinación del valor pulso en muchos deportistas mientras corren,

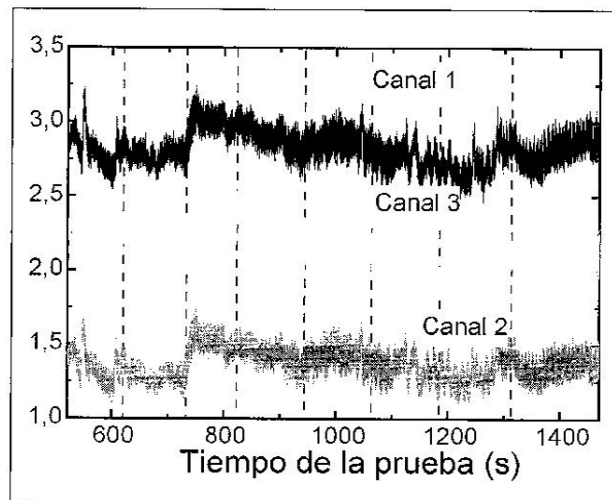


Figura 8. Las señales fotopleletismográficas adquiridas durante la realización de una prueba de esfuerzo máxima. Cada canal corresponde a la medida realizada con cada una de las longitudes de onda del sensor. Las líneas punteadas marcan las diferentes etapas de la prueba.

producen fallos en el sistema a frecuencias cardíacas altas. A continuación exponemos una figura del procesamiento de señal a través del ppg para la obtención del pulso en el prototipo desarrollado (Figura 8).

Con todos los datos obtenidos y expuestos con anterioridad, se procedió entonces a realizar el estudio estadístico a través del programa SSPP (12.05), teniendo en cuenta las siguientes variables influenciadas, tales como sexo, deporte fútbol, deporte anaeróbico, estatura, peso, talla y consumo máximo de oxígeno (Vo_2 máx.) en relación con el tiempo de aparición de la desaturación de oxígeno, tal y como exponemos en la siguiente tabla (Tabla VI).

Con posterioridad, se procedió a efectuar las regresiones de R y R cuadrado de las diferentes variables con la variable tiempo de aparición del tiempo de de-

Tabla VI

Variables introducidas y eliminadas para poder realizar el estudio estadístico

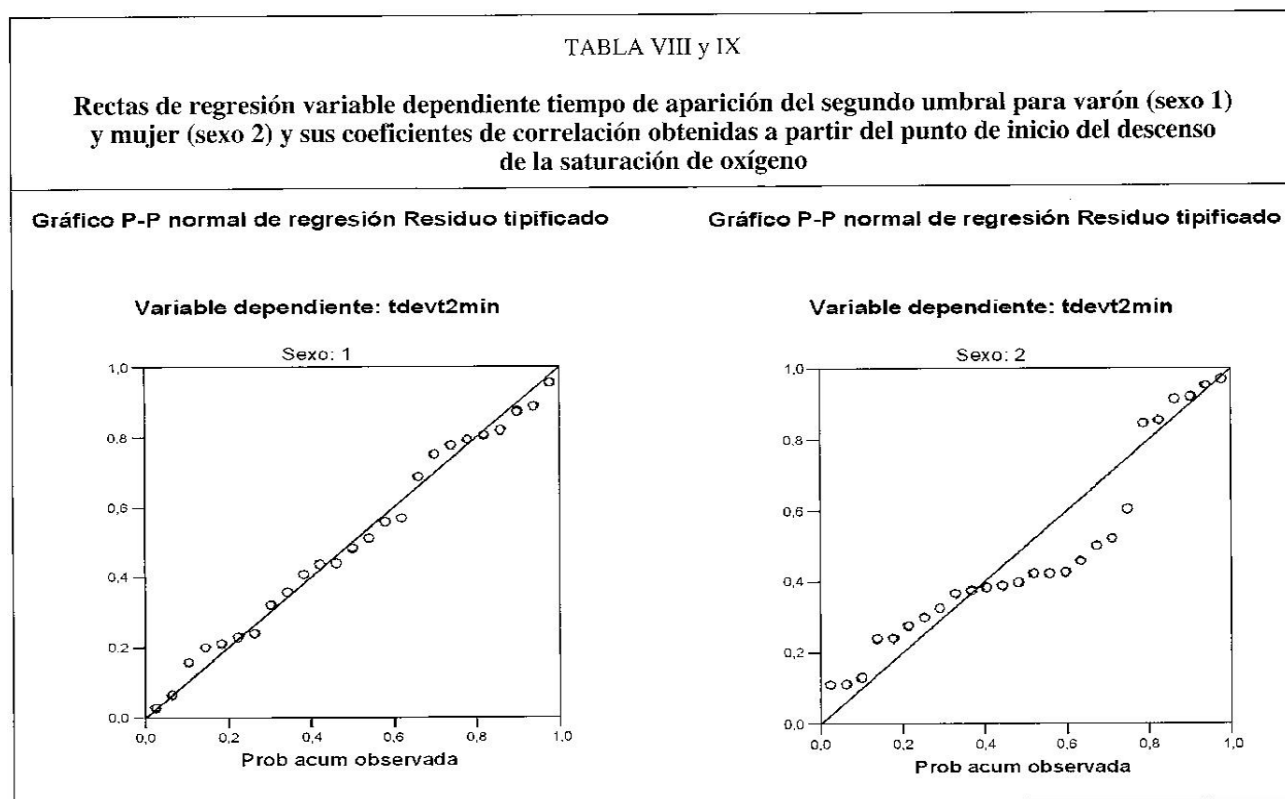
Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	Fútbol, Anaeróbico, Peso (kg), tdesatura, Edad, Talla (cm), VO_2 max (ml/kg/min), Sexo(a)	-	Introducir
2	-	Anaeróbico	Hacia atrás (criterio: Prob. de F para eliminar \geq ,100).
3	-	Sexo	Hacia atrás (criterio: Prob. de F para eliminar \geq ,100).
4	-	Talla (cm)	Hacia atrás (criterio: Prob. de F para eliminar \geq ,100).

Tabla VII

Resultados de las R y R cuadrados en función de las variables consideradas

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. del cambio en F
1	,887(a)	,787	,746	53,04006	,787	19,352	8	42	,000
2	,887(b)	,787	,752	52,41970	,000	,000	1	42	,996
3	,887(c)	,786	,757	51,83469	,000	,023	1	43	,879
4	,883(d)	,779	,754	52,16355	-,008	1,573	1	44	,216

a Variables predictoras: (Constante), Futbol, Anaerobico, Peso (kg), tdesatura, Edad, Talla (cm), VO2 max (ml/kg/min), Sexo
 b Variables predictoras: (Constante), Futbol, Peso (kg), tdesatura, Edad, Talla (cm), VO2 max (ml/kg/min). Sexo
 c Variables predictoras: (Constante), Futbol, Peso (kg), tdesatura, Edad, Talla (cm), VO2 max (ml/kg/min)
 d Variables predictoras: (Constante), Futbol, Peso (kg), tdesatura, Edad, VO2 max (ml/kg/min)
 e Variable dependiente: tdevt2min



saturation, obteniendo R de correlación de 0,887 y de R cuadrado de 0,787, valores muy buenos de correlación entre todos los datos estudiados. (ver Tabla VII).

Como dato sobreañadido y de gran valor a la hora de entender este estudio estadístico, se procedió a efectuar rectas de regresión entre las variables consideradas anteriormente y el tiempo de aparición del segundo umbral ventilatorio, obteniéndose unas muy

buenas rectas y parámetros aritméticos de correlación tanto para el sexo masculino (sexo 1) como el femenino (sexo 2) (Tabla VIII y Tabla IX).

Estos datos de suma importancia nos indican una alta probabilidad de predecir el segundo umbral ventilatorio a través del dato tiempo de inicio del descenso en el valor saturación de oxígeno. Sin embargo, resulta más elocuente que la R cuadrado y R cuadrado co-

TABLA X
Resultados de los estudios de R, R cuadrado y R cuadrado corregida, en función variable sexo, para la población deportista estudiada y en función del valor tiempo de aparición del descenso de la saturación de oxígeno

Modelo	R	R		Error típ. de la estimación	Cambio en R cuadrado	Estadísticos de cambio			Sig. del cambio en F
		R cuadrado	R cuadrado corregida			Cambio en F	gl1	gl2	
1	,891(a)	,795	,715	,64716	,795	9,946	7	18	,000
2	,891(b)	,794	,729	,63118	-.001	,073	1	18	,790
Resumen del modelo(c,d)									
a Variables predictoras: (Constante), Futbol, Talla (cm), tdesatura, Anaerobico, Edad, Peso (kg), VO2 max (ml/kg/min)									
b Variables predictoras: (Constante), Futbol, Talla (cm), tdesatura, Anaerobico, Edad, VO2 max (ml/kg/min)									
c Variable dependiente: tdevt2min									
d Sexo = 2									

regida, como variable predictora sea para R cercano al 0,891 para ambos sexos y mayor de 0,5 para R cuadrado y R corregido, tal como se ve en la tabla siguiente (Tabla X).

Discusión

La oximetría de pulso es una técnica no cruenta para determinar la saturación de oxígeno en la hemoglobina sanguínea y su uso está ampliamente establecido en distintas unidades hospitalarias, tanto en UVI, resucitación cardiopulmonar y estudios de enfermedades pulmonares (1-8, 11, 24, 25).

Su uso ya ha sido aceptado para las situaciones de reposo, donde diferentes estudios han objetivado elevados niveles de precisión. Sin embargo su precisión ha sido ampliamente estudiada en función del lugar de disposición del sensor y de los movimientos (26, 27).

La realización de nuestro estudio sobre dos poblaciones diferenciadas por el sexo, con el uso de dos diferentes tipos de ergómetros, viene determinado por el interés en analizar y estudiar la influencia del gesto deportivo y el movimiento sobre la determinación de la saturación de oxígeno (7, 26-28).

En lo que respecta a la raza de la población estudiada, en nuestro caso todos los deportistas eran de raza caucásica para minimizar el efecto de la piel oscura sobre la determinación de saturación de oxígeno en la hemoglobina sanguínea y tal como ha sido descrito repetidamente por investigadores (1, 2).

Las edades medias de los deportistas sometidos a dicho estudio son muy similares a las utilizadas en otra serie de estudios (26, 29, 30) excepto para estu-

dios de determinación de saturación de oxígeno sobre diferentes enfermedades pulmonares (24).

El número de personas sometidas al experimento fueron de 51 deportistas sanos (26 mujeres y 25 varones), serie suficientemente amplia comparada con otros grupos de estudio con muestras poblacionales inclusive inferiores a las nuestras (26, 30).

Habitualmente los oxímetros de pulso suelen verse influenciados por dispositivos que generan campos electromagnéticos y crean interferencias (1), es por lo cual, para la realización de la prueba de esfuerzo con tapiz rodante, se ha visto que dicho efecto al mejorar la señal del prototipo así como el algoritmo a servido para minimizar estos efectos.

Sobre la colocación del oxímetro en las manos, la mayoría de los estudios para realizar comparaciones con varios prototipos (26, 30) han dispuesto estos en los dedos índices de cada mano, en nuestro caso la utilización de los dedos índices con anclaje posterior al dedo corazón, nos pareció el método más efectivo para la toma de muestra sin la interferencia de los agarres posteriores que realizan los deportistas a los ergómetros. Aunque inicialmente se optó por mantener los dedos unidos entre si y posteriormente a la palma de la mano, dejando libres los dedos índice y pulgar para el agarre posterior, sin embargo se observó una mejor toma de medida cuando esta mano se mantenía abierta y cubierta posteriormente con una venda elástica. Esta pequeña corrección impedía el cambio de posición del oxímetro del lecho ungueal, por efecto de la fuerza centrífuga sobre todo durante el braceo de la carrera y no afectaba el diámetro del dedo de los atletas de sexo femenino.

Yamaha y colaboradores en estudios realizados para

determinar la validez de las medidas de la saturación de oxígeno durante el máximo esfuerzo, eliminaba las medidas de la misma que cotejadas a través de la frecuencia cardíaca y el pulso discrepasen más de 10 latidos/min desde el valor del registro electrocardiográfico continuo. Esto mismo fue continuamente verificado por nuestro grupo investigador tanto durante el desarrollo de la prueba así como en el análisis posterior de los datos obtenidos.

Antes de iniciar la prueba de esfuerzo se mantenía una autocalibración de varios minutos de duración cuyo interés prioritario era únicamente corroborar las observaciones realizadas por ciertas investigaciones que sugieren que una vez iniciado el movimiento el porcentaje de resultados artefactados eran superiores si no se guardaban unos minutos de reposo, previos al inicio de la prueba de esfuerzo (27).

Con respecto a los resultados, en la mayoría de las pruebas y no en todas, se obtuvo una buena coincidencia de los valores por parte de ambos dispositivos, siendo mejorada progresivamente, para las pruebas realizadas con tapiz rodante. Esto nos hace pensar que una mejora en la ergonomía del sensor, una elaboración más adecuada de la señal fotoplestismográfica, una mejora del algoritmo matemático de determinación, así como una mejor integración de la señal en estas situaciones puede mejorar el éxito de la medición.

Con este tipo de medidas oximétricas se han observado coeficientes de correlación elevados (0,88), para ambos sexos, entre el consumo máximo de oxígeno y el tiempo de duración de la prueba y correlaciones muy elevadas entre el tiempo en aparecer el segundo umbral ventilatorio y el tiempo en que aparece el valor más bajo de saturación de oxígeno en sangre (0,87). Esto es de gran interés, porque nos indica al valor de la saturación de oxígeno como un valor con potencial futuro en la ayuda a la determinación de segundo umbral ventilatorio. La utilización de este tipo de técnica en pruebas de esfuerzo máximas permitiría una medida más generalizada y frecuente y de mayor utilidad práctica. Además, se podría evaluar el rendimiento físico de las deportistas en pruebas de campo, que estarían perfectamente adaptadas a las características de cada deporte inclusive llegando a obtener amplias correlaciones con el consumo de oxígeno.

El dato tiempo de aparición de la bajada de saturación de oxígeno periférico se ha visto que presenta una altísima tasa de correlación con el valor de tiempo del segundo umbral tanto para hombres como mujeres. Sin embargo, nos llama poderosamente la atención que estudios publicados (31, 32) atribu-

yan la presencia de descensos en la saturación de oxígeno periférico medida en mujeres, a problemas no conclusos de falta de adecuación del sistema respiratorio al esfuerzo físico, especialmente en mujeres.

Conclusiones

Con el oxímetro Prototipo se observa mejores resultados de registro continuo durante una prueba de esfuerzo, especialmente a altas velocidades de carrera, en las que hay movimiento de grandes grupos musculares (tapiz rodante) que en el oxímetro comercial, dado que las mejoras que vamos introduciendo ayudan a procesar más adecuadamente la señal. Esto es en parte debido a la gran cantidad de "ruido" que artefacta los registros y a la modificación que se ha efectuado sobre las longitudes de onda utilizadas, mejora del algoritmo matemático y mejora de la señal recibida.

Para mejorar la precisión de la medida del oxímetro de pulso durante la realización de ejercicio máximo, es necesario mejorar aún más la ergonomía del sensor de registro, aislar mejor el cableado y mejorar la fijación en el dedo. De esta manera sería posible utilizar el oxímetro Prototipo para la determinación de la desaturación de oxígeno durante una prueba de esfuerzo, con independencia de los medios utilizados (tapiz o bicicleta), ya que con el oxímetro comercial con el que lo hemos comparado, es imposible realizar estas modificaciones.

Con este tipo de medidas oximétricas estamos observando que sería posible la realización de estimaciones con un porcentaje de acierto superior al 80% del consumo máximo de oxígeno, como se ha demostrado con las pruebas realizadas en el tapiz. También se han observado coeficientes de correlación elevados (0,88), para ambos sexos, entre el consumo máximo de oxígeno y el tiempo de duración de la prueba y correlaciones muy elevadas entre el tiempo en aparecer el segundo umbral ventilatorio y el tiempo en que aparece el valor más bajo de saturación de oxígeno en sangre (0,87). La utilización de este tipo de técnica en pruebas de esfuerzo máximas permitiría una medida más generalizada y frecuente. Además, se podría evaluar el rendimiento físico de los deportistas en pruebas de campo, que estarían perfectamente adaptadas a las características de cada deporte inclusive llegando a obtener amplias correlaciones con el consumo de oxígeno. Este tipo de medida facilitaría el uso de oxímetros en el campo de juego o en la propia pista, siempre y cuando sean mejorados desde el punto de vista ingeniero y físico.

Agradecimientos

Este trabajo ha podido ser realizado gracias a la financiación de los siguientes proyectos de investigación del Ministerio de Educación y Ciencia CSD y Ministerio De ciencia y Tecnología (TIC98-1025); CSD 04/EPB 10/03; CSD 01/EPB 10/04 y CSD 01/EPB 10/04. S. M. López Silva es investigadora del Programa "Ramón y Cajal".

Bibliografía

1. Mendelson Y. Pulse oximetry: theory and applications for noninvasive monitoring. *Clin Chem.* 1992; 38: 1601-1607.
2. Severinghaus JW. History and recent developments in pulse oximetry. *Scand J Clin Lab Invest.* 1993; v 53, Suppl 214: 105-111.
3. López Silva SM. Hemoglobin derivatives determination using optoelectronic devices. *Optoelectronic Materials and their Applications.* eds. F. Leccabue, O. de Melo Pereira, I. Hernández Calderón. De. ETS. Pisa (1993). Pág. 275-277.
4. Lindberg LG, Lennmarken C, Vegfors M. Pulse oximetry - clinical implications and recent technical developments. *Acta Anaesthesiol Scand.* 1995; 39: 279-287.
5. Zijlstra WG, Buursma A, Meeuwssen-van-der-Roest WP. Absorption spectra of human fetal and adult oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin, carboxyhemoglobin, and methemoglobin. *Clin Chem.* 1991; 37: 1633-1638.
6. Whyte RK, Jangaard KA, Dooley KC. From oxygen content to pulse oximetry: completing the picture in the newborn. *Acta Anaesthesiol Scand Suppl.* 1995; 107: 95-100.
7. Planes C, Leroy M, Foray E, Raffestin B. Arterial blood gases during exercise: validity of transcutaneous measurements. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001; 82:1686-1691.
8. McGovern JP, Sasse SA, Stansbury DW, Causing LA, Light RW. Comparison of oxygen saturation by pulse oximetry and co-oximetry during exercise testing in patients with COPD. *Chest.* 1996; 109: 1151-1155.
9. Galy O, Maimoun L, Coste O, Manetta J, Préfaut C, Hue O. Effect of training on exercise-induced desaturation during a competitive season in triathletes. *Science & Sports* 2003 ; 18 : 57-58.
10. Lévy P, Pépin JL, Deschaus-Blanc C, Paramelle B, Brambilla C. Accuracy of oximetry for detection of respiratory disturbances in sleep apnea syndrome. *Chest.* 1996; 109: 395-399.
11. Moyle JT. Uses and abuses of pulse oximetry. *Arch Dis Child.* 1996; 74: 77-80.
12. Wahr JA, Tremper KK. Noninvasive oxygen monitoring techniques. *Crit Care Clin.* 1995; 11: 199-217.
13. Mannheim PD, Casciani JR, Fein ME, Nierlich SL. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, v44, p148-158, 1997.
14. Rice AJ, Scroop GC, Gore CJ, Thornton AT, Chapman MA, Greville HW, Holmes MD, Seicchitano R. Exercise-induced hypoxemia in highly trained cyclists at 40% peak oxygen uptake. *Eur J Appl Physiol* 1999; 79 (4): 353-9.
15. Gavin TP, Stager JM. The effect of exercise modality on exercise-induced hypoxemia. *Respir Physiol* 1999; 15 (3): 317-23.
16. Mellerowicz H. *Ergometría.* 3ª Ed. Panamericana. Buenos Aires 1984.
17. Breuer HW, Groeben H, Schondeling H, Worth H. Comparative analysis of arterial oxygen saturations during exercise by oximetry, photometric measurements, and calculation procedures. *Int J Sports Med* 1990; 11: 22-25
18. Norton LH, Squires B, Craig NP, McLeay G, McGrath P, Norton KI. Accuracy of pulse oximetry during exercise stress testing. *Int J Sports Med* 1992; 7: 523-527.
19. Benoit H, Costes F, Feasson L, Lacour JR, Roche F, Denis C, Geysant A, Barthélemy JC. Accuracy of pulse oximetry during intense exercise under severe hypoxic conditions. *Eur J Appl Physiol* 1997; 76 (3): 260-3.
20. Wood RJ, Gore CJ, Hahn AG, Norton KI, Scroop, GC, Campbell, DP, Watson DB, Emonson DL. Accuracy of two pulse oximeters during maximal cycling exercise. *Aus J Sci Med Sport* 1997; 29 (2): 47-50.
21. Mengelkoch LJ, Martín D, Lawier J. Review of the principles of pulse oximetry and accuracy of pulse oximeter estimates during exercise. *Physical Therapy.* 1994; 74(1): 40-49.
22. Martín Escudero MP. *La oximetría en registro continuo en el esfuerzo máximo en distintas especialidades deportivas.* Tesis doctoral. Diciembre 1997. Facultad de Medicina. Universidad Complutense de Madrid.
23. López S, Giannetti R, Dotor ML, Sendra JR, Silveira JP, Briones F. Application of near infrared laser diodes to pulse oximetry. *Prog. In Biomed. Opt.* 1998; 3570: 294-302.
24. Hadeli KO, Siegel EM, Shemill DL, Beck KC, Enright PL. Predictors of oxygen desaturation during submaximal exercise in 8,000 patients. *Chest* 2001; 120:88-92.
25. Kelly A-M, McAlpine R, Kyle E. How accurate are pulse oximeters in patients with acute exacerbations of chronic obstructive airways diseases? *Resp. Med.* 2001; 95: 336-340.
26. Yamaya Y, Bogaard HJ, Wagner PD, Niizeki K, Hopkins SR. Validity of pulse oximetry during maximal exercise in normoxia, hypoxia and hiperoxia. *J. Appl. Physiol.* 2002; 92: 162-168.
27. Barker SJ, Shah NK. Effects of motion on the performance of pulse oximeters in volunteers. *Anesthesiology.* 1996; 85: 774-781.
28. Powers SK, Dood S, Freeman J, Ayers GD, Samson H, McKnight T. Accuracy of pulse oximetry to estimate HbO2 fraction of total Hb during exercise. *J. Appl. Physiol.* 1989; 67: 300-304.
29. Bhamhani Y, Buckley S, Susaki T. Muscle oxygenation trends during constant work rate cycle exercise in men and women. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 1999; 31: 90-98.
30. Sheel AW, Edwards MR, Hunte GS, McKenzie D. Influence of inhaled nitric oxide on gas exchange during normoxic and hypoxic exercise in highly trained cyclist. *J. Appl. Physiol.* 2001; 90: 926-932.
31. Richards J et al. Prevalence of exercise-induced arterial hypoxemia in healthy women. *Med Scien Sports Exerc.* 2004; 36(9): 1514-1521.
32. Croix et al. Effects of prior exercise on exercise-induced arterial hypoxemia in young women. *J Appl Physiol.* 1998; 85 (4): 1556-1563.